技術資料

633nmレーザ波長校正と不確かさ

石川　純*

（平成17年4月13日受理）

Wavelength calibration and it's uncertainty at 633nm

Jun ISHIKAWA

1.　はじめに

現在，日本国における計量法上の長さ標準（特定標準器）は，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ装置（波長633 nm）である．長さに関するJCSSの校正は，すべて特定標準器であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザにトレーサブルであることが求められる．最上位の標準であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの使用される機会は限定的であり，したがってその維持・校正に関する実用的な技術情報の入手は困難である．以前に筆者は，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの設計・製作についての技術情報を公開したが[1]，本稿では，特に校正作業に関する実用的な技術について報告する．

2.　ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの不確かさ

2.1　CIPM勧告における不確かさバジェット

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの不確かさは、CIPMの勧告に記載されている[2]．表1はCIPMで勧告された不確かさのバジェット表である．周波数（波長）を決定するパラメータとして，コールドフィンガー温度（ヨウ素蒸気圧）とセル壁面温度（ヨウ素蒸気温度），周波数変調の深さ，共振器内レーザパワーが記載されている．パラメータの設定不確かさと周波数変換係数を掛け合わせることにより周波数不確かさが求められる．ただし，共振器内レーザパワーに関しては，周波数変換係数は定数ではなく，1 kHz/mW以下という条件が記載されている．また，パラメータを伴わない不確かさとして，ヨウ素純度，光ビート周波数測定の不確かさがそれぞれ記載されている．

影響の大きい不確かさの要因は，ヨウ素純度，パワーシフト，光ビート周波数計測の3つで，不確かさはそれぞれ5 kHzと評価されている．しかし，実際にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに携わった経験から，筆者はこの評価は，実際の不確かさより大きめであると考えている．この表においてヨウ素純度による不確かさは5 kHzと評価されているが，安定化周波数を実測してシフトの少ないヨウ素セルを選別すれば，この不確かさは低減できる．また，レーザパワー設定の許容範囲は50%もあり，他のパラメータと比較すると著しく大きい．この許容範囲を20%程度にすることは可能であろう．さらに，光ビート周波数測定の5 kHzという不確かさの意味は明確でない．後節で触れるが，カウンタが正常に動作しているときの光ビート周波数測定の不確かさは極めて小さく，その影響は無視できる．光ビート周波数測定における測定値のばらつきはレーザ周波数の変動によるものであり，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ間の周波数測定の場合，ゲート時間を10秒に設定すると，測定標準偏差はおおむね2 kHz以下となる．つまり，不確かさの要因がこのバジェットシートに記載されたものだけであるならば，より小さい不確かさが期待できるのである．

2.2　CIPMの勧告に含まれない不確かさについて

しかしながら，筆者は，CIPM勧告のバジェット表に記載されていない不確かさの存在を経験していて，10 kHzという合成不確かさの値は，それゆえ妥当であると考えている．

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザのパラメータのうち，レーザパワーの調整はいくつかの方法で行うことができる．レーザ管の電流を増減して，利得を変化させる方法，あるいは損失を変化させる方法である．ヘリウム

＊ 計測標準研究部門　時間周波数科
本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり，個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません．

表1　CIPMの勧告によるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ（633 nm）の不確かさバジェット表

パラメータ	勧告値	許容範囲	周波数換算係数	不確かさ（kHz）
ヨウ素セル				
壁面温度	25 ℃	5 ℃	0.5 kHz/℃	2.5
コールドフィンガー温度	15 ℃	0.2℃	-15 kHz/℃	3.0
ヨウ素純度の影響				5.0
周波数変調深さ（p-p）	6 MHz	0.3 MHz	-10 kHz/MHz	3.0
共振器内一方向光強度	10 mW	5 mW	≦1.0 kHz/mW	5.0
2台のレーザ間のビート周波数計測不確かさ				5.0
合成標準不確かさ				10.0 kHz

表2　周波数のレーザパワー調整法依存性

レーザパワー調整方法（図２参照）	レーザパワー（共振器内）	周波数差（f成分）	測定標準偏差
ミラー傾斜（A）	13.3 mW	19.2 kHz	0.8 kHz
ミラー傾斜（B）	12.3 mW	12.0 kHz	1.6 kHz
ミラー傾斜（C）	11.8 mW	0.8 kHz	0.9 kHz
ミラー傾斜（D）	13.5 mW	13.9 kHz	1.2 kHz
レーザチューブ回転（E）	12.8 mW	6.0 kHz	0.7 kHz

ネオンレーザの損失は，出力ミラーの透過，散乱，レーザチューブ毛細管によるビームのケラレがある．レーザチューブ毛細管によるビームのケラレ損失は，アライメントを故意に崩すことにより調整することができる．外部鏡レーザの場合は，ブリュースターウィンドウにおける反射・散乱も損失となる．ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは，レーザチューブとヨウ素セルがそれぞれブリュースターウィンドウを有しており，その位置関係をねじることにより反射損失を調整することもできる．表2はレーザパワーの調整を，図1に示したように，アライメントを崩すこと（A,B,C,D），ブリュースターウィンドウにおける反射を増加させること（E）によりそれぞれ行った場合のレーザ周波数（f成分に安定化したときの参照レーザとの周波数差）を示す．レーザパワーは完全に一致させることは難しいので，できるだけ等しくなるように調整した．表2から明らかであるが，レーザの周波数には，パワー調整方法に対する強い依存性が存在する．

この依存性の原因は，定性的には共振周波数近傍にお
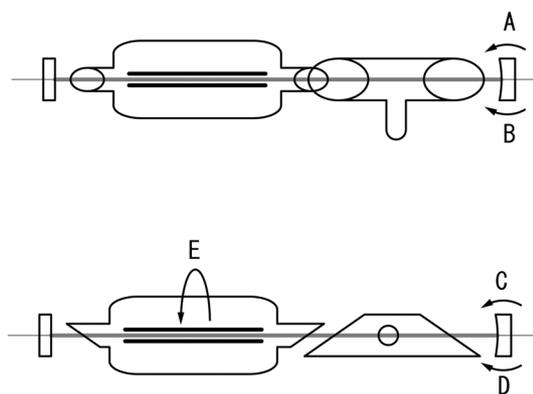
図1　レーザパワーを最大に調整した状態から，レーザミラーをA，B，C，D，の方向へ傾けてパワー調整を行った場合と，レーザチューブを回転してブリュースターウィンドウの反射を増大させてパワー調整を行った場合(E)，レーザ周波数はかなり変化する（表2）．

けるヨウ素ガスの屈折率変化にあると推測されているが，定量的には十分に把握されていない．ヨウ素ガスの屈折

率変化により，レーザビーム径の僅かな変化，およびヨウ素セルブリュースターウィンドウにおける屈折角に僅かな変化が生じると考えられる．この変化がレーザチューブ毛細管におけるケラレ損失の変化，すなわちレーザ出力の変化を引き起こし，周波数シフトの原因になると推測される．しかしながらビーム径・角度の変化は極めて僅かであり，安定化レーザ周波数の変化としてしか検出することができないレベルである．レーザチューブ毛細管によるケラレ損失は，必然的に毛細管の形状の影響も受けるので，周波数変化のレーザチューブに対する依存性も考えられる．実際，レーザチューブを交換すると安定化周波数の変化，さらにパワー調整方法依存性も変化することを筆者は経験している．レーザチューブ形状（断面形状・直線性）のより高精度な測定・加工が実現できればこの不確かさを低減できる可能性はあるが，技術的困難（および経済的困難）からこの方面の研究は進んでいない．

3.　光ビート計測の留意点

3.1　光ビート計測の不確かさ

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを用いた波長安定化ヘリウムネオンレーザの校正は，レーザ光を重ね合わせて検出される光ビート信号の周波数を測定することにより行う．光ビート信号の周波数は，2台のレーザの周波数差の絶対値に一致するので，既知であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ周波数にビート周波数を加える（あるいは引く）ことにより被校正レーザの周波数を求めることができる．被校正レーザの周波数がヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの周波数より高い，あるいは低いかは，2つ以上の吸収成分の周波数と比較することにより判定することができる．

光ビート周波数測定の不確かさは，カウンタ分解能とカウンタの参照周波数不確かさで決定される．最も単純なゼロクロスの計数のみを行うカウンタの場合，その分解能は1/T（Hz）となる．Tは秒で表したカウンタのゲートタイムである．ゲートタイムを10秒にするとカウンタの分解能は0.1 Hzとなる．

参照周波数不確かさの測定周波数に対する影響は，参照周波数の相対不確かさと測定周波数の積となる．光ビート周波数測定の不確かさ1 kHzを達成するためには，測定周波数が50 MHzの場合には20 ppm，500 MHzの場合には2 ppm以下の相対不確かさが参照周波数に求められる．この不確かさは，温度安定化した水晶発振器であれば容易に達成できる．校正結果に対するカウンタの分解能・参照周波数の不確かさの影響は，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの不確かさの影響と比較すると完全に無視できる．

3.2　光ビート信号検出

光ビート信号は原理的にショットノイズを伴い，またヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザには6 MHz ppの周波数変調がかかっているので，カウンタの誤動作を発生させやすい．光ビート計測で最も留意すべきことは，カウンタ誤動作の防止である．

カウンタの正常動作を実現するために必要なことは，ビート信号のSNを向上させることである．光ビート信号は，周波数の僅かに異なるレーザ光を重ね合わせたときに生じるビート（うなり）を光検出器でとらえたものである．良好なSNのビート信号を得るためには，第一に2光線を平行に重ねることが重要である．2光線の重ね合わせが平行でない場合，光ビートの位相が検出場所に依存して変化するので，光検出器上で打ち消しあい，検出されるビート信号のレベルは小さくなる．図2に2光線を平行に重ね合わせるための光学系を示す．2光線の平行の調整は，1. 図2の反射鏡の角度を調整し，半透鏡の直後で2光線が重なるようにする．2. 半透鏡の角度を調整し，半透鏡からできるだけ離れたところで2光線が重なるようにする．この操作を2～3回繰り返すことにより，2光線を平行に重ね合わせることができる．2光線の偏光方向を一致させることも必要である．

光ビート検出に用いる光検出器は，高感度・低ノイズであることが必要であり，増倍効果をもつアバランシェフォトダイオードを用いたものが適している．ピンフォトダイオード等の増倍効果を持たない光検出素子を用いた場合，十分なSNを得るためには入射光量を多くすることが必要となり，全光線をレンズで集光しなければならない．この場合，光線全域でビートの位相が揃っていることが必要で，2光線の平行性だけでなく，ビーム径，波
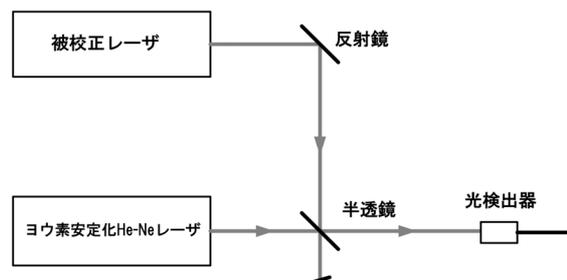
図2　光ビート計測を行うための基本的な光学系。反射鏡，半透鏡は，光軸調整を行うために微動マウントにセットさせる．

面の曲率半径も合わせなければならない．またレンズで集光するという光学系は必然的にオートコリメータとしての作用を持つので，戻り光に極めて敏感なヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに対して光アイソレータが必要となる．一方，アバランシェフォトダイオードの感度は増倍効果によりピンフォトダイオードの100倍以上にもなり，受光部の直径が0.5 mm程度の小さなものでもレンズで集光することなく，十分なレベルのビート信号が得られる．

アバランシェフォトダーオードの増倍機能を働かせるためには安定化した高電圧バイアス電源が必要であり，取扱が面倒であった．しかし現在では，アバランシェフォトダーオード・安定化高圧電源・RFアンプが一体となったモジュールが商品化されていて，光ビート検出は非常に容易になった．筆者は，浜松フォトニクス株式会社製のC5658型APDモジュールを使用している．このモジュールのアバランシェフォトダイオート受光面の直径は0.5 mmと小さいが高感度であり，光ビート検出に際して集光レンズは不要である．受光面が小さいので光軸調整の許容範囲は大きい．集光レンズを使わなければ，受光面を光軸に対して少し傾けるだけで，戻り光を十分に防ぐことができる．周波数帯域は1 MHz～1 GHzであり，ヘリウムネオンレーザ間の光ビート検出には必要かつ十分である．電源は直流12 V単電源で，高圧バイアス電圧調整の必要もない．筆者は数台のC5658型APDモジュールを10年にわたり使用しているが，その間に2回，1 GHzの発振が起こるという故障を経験した．原因はいずれもアースの接触不良であった．

3.3　光ビート信号の取り扱い

C5658型APDモジュールを用いてビート検出を行った場合，光軸調整が良好であれば，ビート信号をスペクトラムアナライザに入力すると，図3に示したようにビート周波数の高調波成分が観測される．高調波発生の原因は，十分な強度の光線が入射された結果，光検出器が飽和することにある．この高調波成分はカウンタの動作に悪影響を及ぼすことはない．カウンタはビート信号のゼロクロス点で動作する．入射光が増大して信号のピークが飽和しても，ゼロクロス点における勾配がより急峻になれば，むしろノイズの影響で誤動作する可能性は小さくなり動作が安定する．入射光強度を下げると信号ピークの飽和は消滅し高調波成分の発生は抑えられるが，ゼロクロス点の傾斜は緩くなり，ノイズによる誤動作の可能性は増える．

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザは，動作原理上6
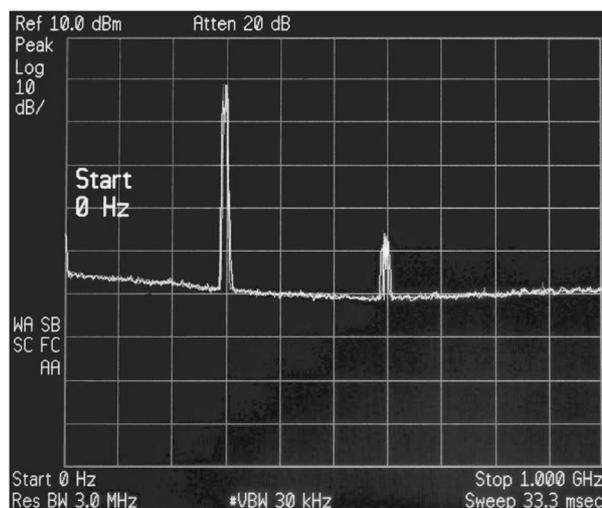
図3　十分な光量が入射されると，光ビート信号には高調波が発生する。この高調波成分は，カウンタによる周波数計測には全く影響しない．

MHz ppの周波数変調がかかっている．したがって，無変調安定化レーザとのビート信号には6 MHz ppの，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ同士を比較する場合には最大12 MHz ppの周波数変調がかかる．この周波数変調はかなり大きいので，正確な周波数計測を実現するためには結線のインピーダンス整合，およびカウンタの動作原理・仕様に注意しなければならない．

インピーダンスに不整合があると，周波数特性に凹凸が生じる．単一周波数の信号を扱う場合には問題にならないが，ビート信号には深い周波数変調がかかっているので，インピーダンス不整合が原因となり，信号の強度変動が引き起こされる可能性がある．インピーダンス整合を実現するためには，すべての機器の入出力インピーダンス，ケーブルインピーダンス，分配器インピーダンスを統一することが必要である．しかし，インピーダンスを整合させるためのフィードスルー抵抗，分配器等は必然的に信号の損失をもたらし，信号レベルの低下は避けられない．本来，周波数特性を平坦化して信号レベルの変動を防ぎ，カウンタの誤動作を避けるためのインピーダンス整合であるが，かなりの信号レベルの低下を伴うので，整合を完全にすることがベストであるとは限らない．光ビート信号経路のインピーダンス整合は，周波数特性の凹凸と信号レベル低下のバランスが肝要である．一例として，高周波信号をスペクトラムアナライザ（入力インピーダンス：50　Ω）とオシロスコープ（入力インピーダンス：1 MΩ）で観側するときの周波数特性を図4に示す．まず，トラッキングオシレータの出力を直

(a)

(b)

(c)
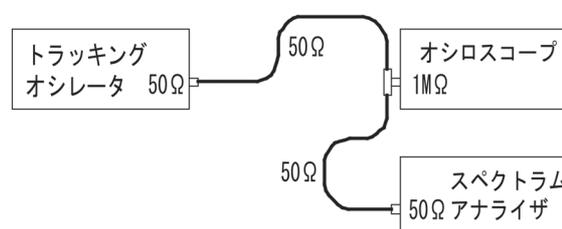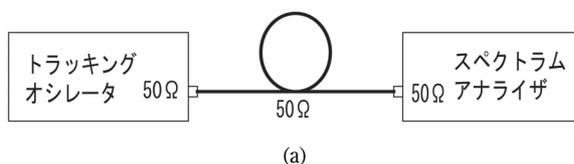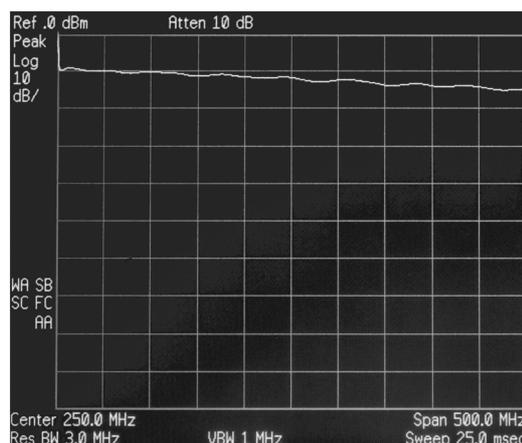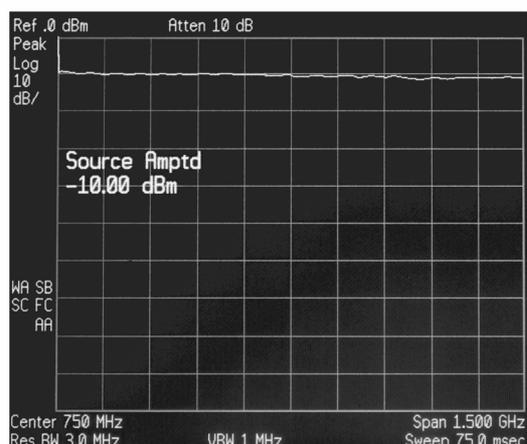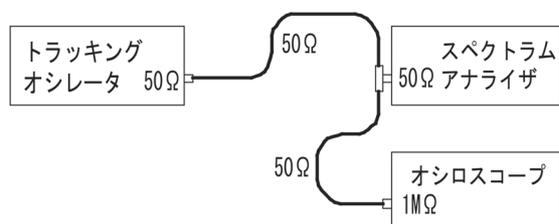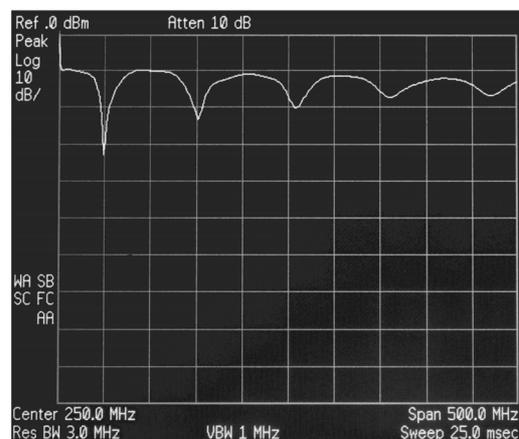
図4　インピーダンス不整合により発生する周波数特性の凹凸．(a) インピーダンス整合が取れていれば周波数特性は平坦である。(b) インピーダンス不整合により，大きな周波数特性の凹凸が発生する。(c) しかし，完全に整合を取らなくても，決線によっては周波数特性の凹凸を大幅に低減することができる．

接スペクトラムアナライザのみに入力した場合，インピーダンスの整合がとれているので周波数特性は平坦である（図4a）．スペクトラムアナライザの入力部からTコネクタ（分配器でない）で分けて，その先にオシロスコープ（入力インピーダンス1MΩ）を接続すると，インピーダンスの整合が崩れ，20 dBという極めて大きなディップが発生する（図4b）．変調を伴ったビート信号周波数がこのディップにかかると，カウンタ入力の変動は振幅比で10倍近くに達し，当然ながら誤動作の可能性が高まる．しかし，オシロスコープ（入力インピーダンス1MΩ）とスペクトラムアナライザの接続場所を交換するだけで，インピーダンス整合は同様に不完全であるにもかかわらず，周波数特性の凹凸は大幅に低減される（図4c）．信号レベルの低下も，高周波領域で若干増えているものの，広帯域抵抗分配器およびフィードスルー抵抗を用いてインピーダンスマッチングを完全にとった場合の損失（6dB）を常に下回る．このように，結線に少し注意するだけで，必要十分な周波数特性の平坦化を，信号レベル低下を抑えつつ実現することができる．

3.4　周波数カウンタ

ビート信号の周波数計測には周波数カウンタが用いられるが,現在最も広く利用されている周波数カウンタは,米国Agilent社（旧Hewlett Packard社）製の53131Aと53132A型である．従来のカウンタが，ゲートを開いているときの信号のゼロクロス点のカウント数から周波数を計算しているのに対して，このカウンタは，ゲートが開いている間，1秒間に最大200,000個のカウント数データを取得して平均化することにより，極めて高い分解能を達成できる．しかしこの平均化機能が正常に機能するためには，入力信号の周波数変調度は25%以下であることが求められる[3]．先に述べたように，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザには6 MHz ppの周波数変調がかかっていて，測定される光ビート周波数によってはこの許容範囲を超える．特にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ同士の比較の場合，両方のレーザの周波数変調が合わさると，ビート信号の変調深さは最大で12 MHzに達する．ヨウ素吸収線d, e, f, g成分については，隣接する吸収線の間隔は12〜13 MHzでるので,光ビート信号の周波数変調度はカウンタの許容値を大幅に超え，誤動作を引き起こす．

カウンタの取扱説明書には，25%以下の許容周波数変調度が要求される動作条件については記載されていない．しかし，実際にこの動作条件を満たす必要があるのは平均化機能が働いているときだけである．平均化機能は，周波数計測においてゲート開閉を時間指定，および桁数（分解能）指定のときに有効となる．ゲート開閉のモードとしてはこの他にAUTOと外部入力がある.AUTOは可能な限り短いゲート時間で測定するモードであり，数秒以上のゲート時間を必要とする光ビート信号周波数の計測には適さない．したがって，このカウンタを用いて光ビート周波数の計測を行うためには，外部入力によるゲートのコントロール，つまりゲート開閉信号を出す外部のコントローラが必要となる．

53131A（53132A）型カウンタは2入力チャンネルを有し，2入力チャンネル間の周波数比較を行うこともできる．この周波数比較機能では平均化機能が無効なので，周波数変調度を考慮する必要はない．カウンタの後部には10 MHzの参照周波数出力コネクタがあるので,この出力を1入力チャンネルに結合し，他の入力チャンネルに光ビート信号を入力して周波数比較行えば，実質的に周波数を測定することになる．周波数を求めるためには,参照周波数(10 MHz)に測定された周波数比を掛ける(割る）必要があるが，外部ゲートコントローラは不要である．

周波数比較機能は，カウンタの正常動作の確認にも有効である．アバランシェフォトダイオードにより検出した光ビート信号は，6 MHz ppの周波数変調，さらにショットノイズが避けられない．筆者の経験では，光ビート信号のレベルがカウンタ仕様の最小レベルに近い場合，誤動作する可能性はかなり高い．カウンタの動作が正常であれば，光ビート信号を1チャンネルと2チャンネルに同時に入力して周波数比較した場合，当然周波数比はぴったり1（1±1最小デジット）となる．ノイズ等により誤動作が発生した場合，2つのチャンネルで完全に同時に誤動作が発生する可能性は極めて低いので，周波数比はぴったり1にならない．つまり，ビート信号を2入力チャネルに同時に入力して，その時の周波数比が完全に1になるかならないかで，誤動作の発生を判断することができる．注意すべき点は，周波数比が，例えば1%ずれていた場合（0.99あるいは1.01），カウンタの誤動作による不確かさは1%程度である，という判断をしてはいけないということである．カウンタの誤動作が両チャンネルで完全に同時ではないにしても，ある程度同期して打ち消しあう，つまり実際の周波数測定誤差よりも小さくなることは十分考えられる．

4.　被校正レーザの不確かさ

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ周波数（波長）不確かさのCIPM勧告値は2.1×10^{-11}である．CIPM勧告のエラーバジェット表は，不確かさ要因の標記ついては不十分であるが，値は妥当であるということを先に述べた．また，カウンタをはじめとする測定機器類の動作が正常であれば，光ビート周波数測定の不確かさは，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ周波数の不確かさと比較して遙かに小さく，完全に無視できることも述べた．したがって，光ビート法によるレーザ周波数（波長）測定の不確かさは，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの不確かさとなる．一方，実用波長安定化レーザのビート周波数測定を行うと大きな周波数の変動が観測される．これは実用波長安定化レーザの周波数変動が原因であるが，ある時点における周波数測定値の不確かさは，ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ周波数の不確かさで決定される.長さ関連の校正は熱膨張による校正器物の長さ変化が不確かさの最大要因であり，これを低減するために校正条件，特に温度を正確に設定することが求められる．レーザ周波数（波長）校正においてもこの条件設定が，長さ関連量ということで踏襲される場合が多い．筆者は，この校正条件の設定は，レーザ周波数（波長）の校正には

適していないと考えている. まず, レーザは熱源であり, 温度を一様にすることは不可能である. 定常状態にすることは可能であっても, 内部の温度分布は, 校正室の風量や風の当たり具合に依存するから, 校正室と実際に使用される現場でこれを等しくすることは不可能である. さらに, レーザ周波数（波長）の温度依存性は, 熱膨張のように必ずしも明白ではないので, 温度設定の不確かさと周波数（波長）の不確かさを結びつけることができない.

安定化レーザの安定化機能とは, 外部の温度変化や諸条件の変化に対してレーザ周波数を一定に保つ機能である. レーザの不確かさは, 安定化機能の性能に大きく依存する. したがって, レーザ周波数（波長）の校正, 特に不確かさに関しては, 安定化機能の性能が反映されることが必要であると筆者は考えている. 安定化機能の性能は, 周囲の環境を積極的に変化させて, その時の周波数変動を測定すること確認することができる. つまり, 校正に際しては周囲の環境を, 安定化レーザの仕様, あるいは顧客の要望の範囲で変化させて, その時の周波数変動から不確かさを求めることが合理的であると考えられる.

5. おわりに

筆者がレーザ波長の校正に携わって10年になる. その間, 自身で開発を行うと共にユーザーでもあるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ, 光ビート法による校正などについては, ある程度の経験を積むことができた. しかし, 実用安定化レーザには直接携わった経験がない. 前節で述べたように, 校正条件や不確かさの扱いについて, 現在でも模索を続けている状況である. 実際に実用安定化レーザの校正を行っているか利用されている方のご意見を戴くことができれば幸いである.

参考文献

1) 石川純, 「CIPM勧告準拠633 nmヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの設計と製作」, 産総研計量標準モノグラフ　第2号（2003年3月）
2) Quinn T.J., Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), Metrologia, 2003, 40(2), 103-133
http://ej.iop.org/links/q57/Vu2sNcWmX8YaO＋nbCZRrTA/me3216.pdf
3) 53131A/132A 225 MHz ユニバーサルカウンタ, 操作ガイド